



## DEUTSCHES

# PATENTAMT

21 Aktenzeichen: P 42 12 461.1  
22 Anmeldetag: 14. 4. 92  
23 Offenlegungstag: 21. 10. 93

DE 4212461 A1

⑦1 Anmelder:

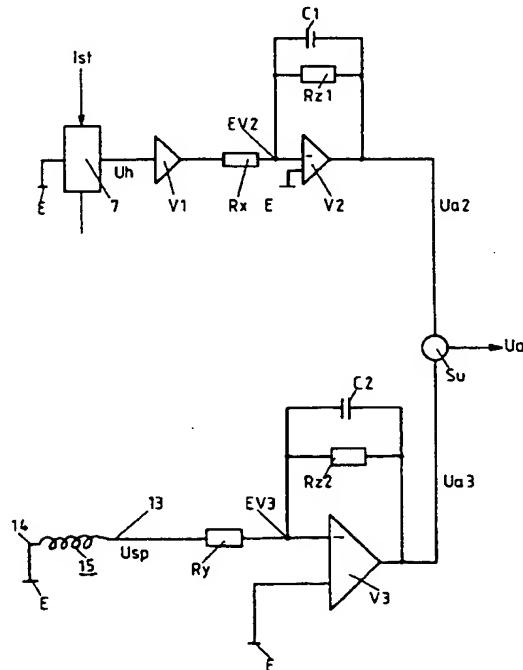
Vacuumschmelze GmbH, 63450 Hanau, DE

72 Erfinder:

Lenhard, Friedrich, Dipl.-Ing., 6450 Hanau, DE;  
Nilius, Hans-Joachim, Dipl.-Ing., 6453 Seligenstadt,  
DE; Baum, Eckhard, Dr., 6455 Erlensee, DE; Hinz,  
Gerhard, Dipl.-Phys., 8755 Alzenau, DE

#### 54 Direktabbildender Stromsensor

57) Direktabbildende Stromsensoren haben gegenüber stromkompensierten Stromsensoren den Vorteil eines wesentlich einfacheren Aufbaus; weisen aber Nachteile bei schnellen Stromänderungen bzw. hohen Frequenzen des zu messenden Stromes auf. Um dieses Frequenzverhalten zu verbessern, wird vorgeschlagen, zusätzlich zu einem Magnetfeldsensor (7), der den Fluß eines vom zu messenden Stromes beeinflußten Magnetkernes (2) erfaßt, eine elektrische Spule (15) vorzusehen, in der eine Spannung entsprechend der Stromänderung des zu messenden Stromes induziert wird. Die Ausgangsspannungen des Magnetfeldsensors und der Spule werden in einer Verstärkerschaltung mit zunächst proportionalem und bei hohen Frequenzen abnehmenden Verstärkungsfaktor addiert, so daß auch bei hohen Frequenzen eine relativ genaue Abbildung des Primärstromes gewährleistet ist.



## Beschreibung

Die Erfindung betrifft einen direktabbildenden Stromsensor mit einem vom zu messenden Strom beeinflußten Magnetkern und einem den Fluß im Magnetkern erfassenden Magnetfeldsensor, dessen Ausgangssignal einer Auswerteschaltung zugeführt wird und als Meßgröße für den zu messenden Strom dient.

Im Unterschied zu Stromsensoren mit Kompensationswicklung, bei denen das durch den zu messenden Strom erzeugte Feld in einem Magnetkern durch einen Kompensationsstrom in einer Sekundärwicklung kompensiert wird und der Magnetfeldsensor in einem Luftspalt oder einem Teilluftspalt des Magnetkerns dazu dient, den Kompensationsstrom über eine Ansteuerung so zu regeln, daß der Fluß im Magnetkern den Wert Null erreicht, verzichtet man bei direktabbildenden Stromsensoren auf die Kompensationswicklung, so daß das durch den Fluß bedingte Ausgangssignal des Magnetfeldsensors — zum Beispiel die Ausgangsspannung eines Hallgenerators — als Maß für den zu messenden Strom herangezogen wird.

Direktabbildende Stromsensoren sind daher einfacher aufgebaut; allerdings müssen dafür einige Nachteile in Kauf genommen werden, wie z. B. die temperatur- und alterungsbedingte Änderung im Ausgangssignal des Magnetfeldsensors, eine prinzipbedingte geringere Abbildungsgenauigkeit, da bei endlichen Flüssen der Magnetkern nicht eine vollkommen lineare Kennlinie der Induktion gegenüber der Feldstärke besitzt und vor allem eine schlechtere dynamische Impulswiderrabe durch induktive Einkopplungen des Streuflusses des Magnetkerns in den Meßkreis, die vor allem bei sehr hohen Frequenzen wirksam werden.

Zur Vermeidung bzw. Verminderung dieser Nachteile ist es beispielsweise aus der DE-OS 33 03 945 bekannt, bei einem direktabbildenden Stromsensor mit einem Hallgenerator als Magnetfeldsensor in dem Luftspalt eines den Primärstrom führenden Leiter umgebenden Magnetkerns erstens die Zuleitungen zum Hallgenerator bifilar zu wickeln, so daß induzierte Spannungen in den Zuleitungen sich weitgehend aufheben, und zweitens einen temperaturabhängigen Transistor in der Auswerteschaltung vorzusehen, der die Temperaturabhängigkeit des Hallgenerators weitgehend kompensiert.

Für viele Anwendungen, beispielsweise für den Betrieb elektrisch angetriebener Fahrzeuge (Bahn, Elektro-Auto), sind einerseits sehr hohe Ströme zu erfassen und andererseits ist es wünschenswert, einen möglichst kostengünstigen Stromsensor mit noch ausreichender Meßgenauigkeit einzusetzen. Neben den höheren Kosten für den Einsatz eines stromkompensierten Stromsensors ist dieser besonders dann nachteilig, wenn sehr hohe Primärströme abzubilden sind, da dann die Kompensationswicklung ebenfalls eine nennenswerte Leistung erfordert.

Hier ist der Einsatz eines direktabbildenden Stromsensors vorteilhaft, zumal dessen Genauigkeit für die genannten und ähnlichen Anwendungen in vielen Fällen ausreichend ist. Allerdings besitzt ein direktabbildender Stromsensor mit einem Magnetfeldsensor im Luftspalt eines Kerns bei sehr schnellen Stromänderungen, wie z. B. im Kurzschlußfalle, stoßartigen Belastungen sowie allgemein bei hohen Frequenzen, den prinzipiellen Nachteil, daß sich induktive Einkopplungen in den Zuleitungen zum Magnetfeldsensor den zu messenden Spannungen überlagern und so das Meßergebnis verfälschen.

schen. Gerade bei schnellen Stromänderungen ist es aber in vielen Fällen erforderlich, durch einen Regler einzutreten oder Schutzmaßnahmen einzuleiten, so daß gerade hier eine ausreichend genaue Abbildung des Primärstromes wesentlich ist.

Die in den Zuleitungen und in dem Magnetfeldsensor selbst induzierten Spannungen sind von der Änderung des Primärstromes bzw. des Flusses im Magnetkern abhängig und steigen daher kontinuierlich mit zunehmender Frequenz, so daß trotz sorgfältiger Verlegung dieser Leitungen der Einsatzbereich derartiger direktabbildender Stromsensoren auf Werte unterhalb einer gewissen Grenzfrequenz beschränkt sind.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es nun, einen direktabbildenden Stromsensor vorzusehen, der bei sonst weitgehend gleichen Eigenschaften eine ausreichend genaue Abbildung des Primärstroms auch bei sehr hohen Frequenzen gewährleistet.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß zusätzlich zum Magnetfeldsensor eine ebenfalls vom Magnetfluß des zu messenden Stroms beeinflußte elektrische Spule vorgesehen ist, daß die in dieser Spule induzierte, der Stromänderung des zu messenden Stroms proportionale Spannung ebenfalls der Auswerteschaltung zugeführt wird und daß die Auswerteschaltung Verstärkerschaltungen enthält, deren frequenzabhängige Verstärkerkennlinien durch entsprechende Dimensionierung so gewählt sind, daß bei niedrigen Frequenzen vorwiegend das Ausgangssignal des Magnetfeldsensors und bei hohen Frequenzen vorwiegend die in der Spule induzierte Spannung zur Bildung des Gesamtausgangssignals des Stromsensors beiträgt.

Vorteilhafte Weiterbildungen des direktabbildenden Stromsensors nach der Erfindung sind in den Unteransprüchen beschrieben.

Im Gegensatz zu einem stromkompensierten Stromsensor wird also die zusätzliche elektrische Spule nicht dazu verwendet, den Magnetfluß in dem Magnetkern auf den Wert Null zu kompensieren, vielmehr wird diese Spule dazu verwendet, die bei direktabbildenden Stromsensoren und hohen Frequenzen unvermeidlichen induktiven Einkopplungen definiert zu erfassen und anstelle oder zusätzlich zum Ausgangssignal des Magnetfeldsensors bei hohen Frequenzen zur Abbildung des Stromes heranzuziehen.

Da somit für die zusätzliche elektrische Spule nur wenige Windungen erforderlich sind, um eine ausreichend hohe Spannung bei den höheren Frequenzen zu erzielen, kann man diese Wicklung im Prinzip aus einzelnen Bügeln zusammensetzen, die über eine gedruckte Schaltung miteinander zu einer Spule verbunden sind. Dies ist beispielsweise in der DE-PS 12 45 495 beschrieben. Diese Bügel können bei einem hochpermeablen Magnetkern voneinander relativ große Abstände haben, da der Streufluß des Magnetkerns relativ gering ist; sie können daher auch zur Befestigung des Magnetkerns auf einer Unterlage dienen.

Ausführungsbeispiele sind in den Figuren im einzelnen dargestellt. Es zeigen:

Fig. 1 eine Ansicht auf den Magnetkern und die zusätzliche elektrische Spule, deren Windungen hier den Magnetkern umschließen;

Fig. 2 eine ausführliche Schaltung für die Auswerteeinrichtung, anhand derer das Prinzip erklärt wird;

Fig. 3 eine vereinfachte Form der Auswerteschaltung, bei der die Ausgangssignale von Magnetfeldsensor und Spule einem gemeinsamen Verstärker zugeführt werden;

Fig. 4 eine Anordnung mit nur einer Spulenwindung im Luftspalt des Magnetkerns unter Verwendung eines Hallgenerators als Magnetfeldsensor;

Fig. 5 den Verlauf des Verstärkungsgrades der Verstärker V2 und V3 nach Fig. 2 in dB, abhängig von der Frequenz im Verhältnis zu einer Grenzfrequenz, bei der die Verstärkungsfaktoren der beiden Verstärker gleich groß sind;

Fig. 6 die Ausgangsspannung eines direktabbildenden Stromsensors bei schneller Änderung des zu messenden Stromes;

Fig. 7 den Verlauf der Ausgangsspannung bei ebenfalls schneller Änderung des Stromes in vergrößertem Maßstab unter Verwendung der erfundungsgemäßen Anordnung mit zusätzlicher elektrischer Spule.

Fig. 1 zeigt auf einer Platte 1 einen ringförmigen Magnetkern 2, der einen Stromleiter 3 umgibt. In dem Stromleiter fließt der Strom  $i_1$ , der durch den erfundungsgemäßen Stromsensor gemessen werden soll. Der Magnetkern 2 besteht aus einem nicht magnetischen Haltering 4 und einem Ringkern 5, in dem sich ein Luftspalt 6 befindet. Innerhalb des Luftspaltes 6 ist ein Magnetfeldsensor 7 angeordnet, der zur Erfassung des Flusses im Magnetkern 2 dient. Der Magnetkern 2 ist mit Bügeln 8 bis 11 an der Platte 1 befestigt. Die Bügel 8 bis 11 bestehen aus leitendem Material und sind durch Leiterbahnen 12 mit den Anschlüssen 13 und 14 zu einer Spule 15 verbunden.

Da der Ringkern 5 aus hochpermeablem, weichmagnetischem Material besteht, kann man den Streufluß vernachlässigen, so daß die Bügel 8 bis 11 trotz ihres Abstandes voneinander zusammen mit den Leiterbahnen 12 wie eine "Rogowskispirale" wirken, die normalerweise aus um einen Torus dichtgewickelten Windungen besteht, die einen Stromleiter umgeben und eine der Stromänderungsgeschwindigkeit des Stromes  $i_1$  im Stromleiter 3 proportionale Spannung liefern. Hier wird also der Magnetkern 2 ausgenutzt um zu gewährleisten, daß durch alle Bügel 8 bis 11 der gleiche Fluß hindurchtritt. Andererseits werden die Bügel 8 bis 11 ausgenutzt, um den Magnetkern 2 auf der Platte 1 zusätzlich zu fixieren.

Es bleibt aber anzumerken, daß der der Erfundung zugrundeliegende Effekt auch mit einer Ringspule erzielt werden kann, die getrennt vom Magnetkern 2 angeordnet ist. Voraussetzung dafür, daß tatsächlich die Spannung an den Anschlüssen 13 und 14 der Stromänderung proportional ist, ist eine solche Dimensionierung des Ringkerns 5, daß dieser bei den vorkommenden Strömen nicht in Sättigung gelangt. Es kann daher vorteilhaft sein, anstelle des einen Luftspaltes 6, mehrere am Umfang des Ringkerns 5 verteilte Luftspalte vorzusehen und — um die Wirkung der Streuflüsse im Bereich der Luftspalte möglichst auszuschalten — die Bügel 8 bis 11 in Bereichen des Ringkerns 5 ohne Luftspalt anzurichten.

Fig. 2 zeigt nun eine Schaltung, mit der aus den Ausgangssignalen (Spannungen) des Magnetfeldsensors 7 und der Spule 15 eine Gesamtausgangsspannung  $U_a$  gewonnen werden kann, die ein Abbild des Stromes  $i_1$  im Stromleiter 3 auch bei Stromimpulsen und schnellen Stromänderungen liefert. Als Magnetfeldsensor 7 dient hier ein Hallgenerator, dessen Steuerstrom mit  $i_{ST}$  bezeichnet ist und der in Verbindung mit dem Magnetfeld des Magnetkerns 2 eine Spannung  $U_h$  liefert, die an der rechten Seite des Magnetfeldsensors 7 abgegriffen wird, während die linke Seite mit Erde E verbunden ist. Die Spannung  $U_h$  dient nun als Eingangsspannung für einen

Verstärker V1, der diese Spannung auf einen Wert vergrößert, der zur Ansteuerung von Widerständen und weiteren Verstärkern geeignet ist.

Der Ausgang des Verstärkers V1 ist über einen Widerstand  $R_x$  mit einem Eingang eines Verstärkers V2 verbunden, dessen zweiter Eingang ebenfalls an Erde angeschlossen ist. Der Ausgang des Verstärkers V2 ist über die Parallelschaltung eines Widerstandes  $R_{z1}$  und eines Kondensators  $C_1$  auf seinen Eingang EV2 zurückgeführt.

In ähnlicher Weise ist die Schaltung für die Spule 15 aufgebaut. Der Anschluß 14 der Spule 15 ist mit Erde E verbunden und der Anschluß 13, an dem die Spannung  $U_{sp}$  der Spule abgegriffen werden kann, ist über den Widerstand  $R_y$  an den Eingang EV3 des Verstärkers V3 angeschlossen. Der zweite Eingang des Verstärkers V3 ist wiederum mit Erde E verbunden. Der Ausgang des Verstärkers V3 ist über einen Widerstand  $R_2$  und einen Kondensator  $C_2$  in Parallelschaltung wiederum auf den Eingang EV3 zurückgeführt. Außerdem sind die Ausgänge der Verstärker V2 und V3, an denen die Spannungen  $U_{a2}$  und  $U_{a3}$  anstehen, mit einem Summenpunkt  $S_u$  verbunden, der aus diesen Spannungen die Summe bildet, die die Gesamtausgangsspannung  $U_a$  darstellt.

Die Wirkungsweise dieser Schaltung nach Fig. 2 ist nun folgende: Die im Verstärker V1 verstärkte Spannung  $U_h$  ist proportional dem Strom  $i_1$  im Stromleiter 3 (Fig. 1) und liegt über den Widerstand  $R_x$  am Verstärkereingang EV2 des Verstärkers V2 an. Durch die sehr hohe Verstärkung des Verstärkers V2 wird jetzt die Spannung am Ausgang dieses Verstärkers  $U_{a2}$  soweit geändert, daß — bedingt durch den Spannungsabfall an dem Widerstand  $R_x$  einerseits und an der Parallelschaltung des Widerstands  $R_{z1}$  und des Kondensators  $C_1$  andererseits — der Eingang EV2 des Verstärkers wieder annähernd auf Erdpotential liegt. Für niedrige Frequenzen ist der Widerstand des Kondensators  $C_1$  sehr hoch, so daß er in dieser Parallelschaltung vernachlässigt werden kann. Man erhält also eine proportionale Verstärkung, so daß in diesem Bereich die Spannung  $U_{a2}$  proportional der Spannung  $U_h$  und damit proportional dem Strom  $i_1$  im Stromleiter 3 ist. Bei hohen Frequenzen ist jedoch der Widerstand der Parallelschaltung im wesentlichen durch den Widerstand des Kondensators  $C_1$  bestimmt. Dieser Widerstand nimmt mit der Frequenz ab, so daß der Verstärkungsfaktor des Verstärkers V2 mit höher werdender Frequenz kontinuierlich zurückgeht. Oberhalb eines Grenzbereiches der Frequenz ist die Spannung  $U_{a2}$  dann nicht mehr proportional zu dem zu messenden Strom, sondern wird gegenüber der von der Spule 15 über den Verstärker V3 gelieferten Spannung  $U_{a3}$  praktisch vernachlässigbar.

Anders verhält es sich mit der Spannung  $U_{sp}$ , die in der Spule 15 erzeugt wird. Auch der Verstärker V3 hat eine sehr hohe Verstärkung, so daß bedingt durch die Rückkopplung über die Parallelschaltung des Widerstandes  $R_{z2}$  und des Kondensators  $C_2$ , der Eingang EV3 des Verstärkers V3 wiederum nahezu auf Erdpotential gehalten wird. Im Gegensatz zur Spannung  $U_h$  ist allerdings die Spannung  $U_{sp}$  nicht proportional zu dem Strom  $i_1$  im Stromleiter 3, sondern ist bei niedriger Frequenz gleich Null und steigt proportional mit der Frequenz (und natürlich auch mit dem Strom  $i_1$ ) an. Dies hat zur Folge, daß die Spannung  $U_{a3}$  am Ausgang des Verstärkers V3 bei konstantem Strom  $i_1$  und bei steigender Frequenz dieses Stromes kontinuierlich ansteigt; jedoch zunächst gegenüber der Spannung  $U_{a2}$  vernachlässigbar klein ist.

Die Dimensionierung der Widerstände und Kondensatoren ist nun so vorzunehmen, daß in dem gleichen Grenzfrequenzbereich, in dem die Spannung  $U_{a2}$  nicht mehr proportional zur Spannung  $U_h$  ist, auch die Spannung  $U_{a3}$  nicht mehr proportional zur Spannung  $U_{sp}$  wächst. Weiterhin wird hierdurch erreicht, daß bei steigender Frequenz (und immer noch gleichem Strom  $i_1$ ) die Verstärkung des Verstärkers  $V3$  gerade so abnimmt, wie die Spannung  $U_{sp}$  mit der Frequenz ansteigt. Dies ergibt sich, da die Spannung  $U_{sp}$  mit der Stromänderungsgeschwindigkeit gerade so zunimmt, wie der Widerstand des Kondensators  $C2$  abnimmt. Man erhält also eine Spannung  $U_{a3}$ , die bei hohen Frequenzen dem Strom  $i_1$  im Stromleiter 3 wiederum proportional ist. Bei sehr hohen Frequenzen ist die Spannung  $U_{a2}$  soweit abgefallen, daß sie jetzt gegenüber der Spannung  $U_{a3}$  vernachlässigbar ist, so daß die aus der Summe der Spannungen  $U_{a2}$  und  $U_{a3}$  gebildete Gesamtausgangsspannung  $U_a$  im gesamten Frequenzbereich sich nur mit der Größe des Stromes  $i_1$ , aber nicht mit dessen Frequenz ändert.

Die auch in dieser Schaltung bei hohen Frequenzen sich bemerkbar machenden induktiven Einkopplungen in den Zuleitungen zum Magnetfeldsensor und in der übrigen Schaltung, die bei bekannten direktaabbildenden Stromsensoren die Abbildungsspannung (hier Spannung  $U_{a2}$ ) stark beeinflussen, haben hier keinen Einfluß mehr auf die Gesamtausgangsspannung  $U_a$ , da in diesen Frequenzbereichen ohnehin die Spannung  $U_{a2}$  gegenüber der Spannung  $U_{a3}$  vernachlässigbar ist.

Fig. 3 zeigt nun eine vereinfachte Ausführungsform der Schaltung. Der Stromleiter 3 wird wiederum von einem Magnetkern 2 umgeben, der hier vier Luftspalte aufweist mit mindestens einem Magnetfeldsensor 7 in einem Luftspalt 6 und einem Steuerstrom  $i_{ST}$ , wenn als Magnetfeldsensor wiederum ein Hallelement verwendet wird. Die Ausgangsspannung  $U_h$  ist wieder an einen Verstärker  $V1$  angeschlossen. Anstelle der Verstärker  $V2$  und  $V3$  in Fig. 2 ist jetzt nur ein Verstärker  $V4$  vorgesehen (Fig. 3).

Die Anpassung der Kennlinien an den Grenzfrequenzbereich, an dem praktisch die Ablösung der Spannung  $U_{a2}$  von der Spannung  $U_{a3}$  in Fig. 2 erreicht wird, geschieht hier durch die Dimensionierung der wiederum vorhandenen Widerstände  $R_x$  und  $R_y$ , während nur noch eine Parallelschaltung aus dem Widerstand  $Rz4$  und dem Kondensator  $C4$  zum Verstärker  $V4$  genügt, um bei zunehmender Frequenz die Verstärkung des Widerstandes  $V4$  soweit zu vermindern, daß die Gesamtausgangsspannung  $A$  wiederum nur dem Strom  $i_1$ , nicht aber dessen Frequenz proportional ist.

Die Grenzfrequenz wird hier für die Spannungen des Magnetfeldsensors 7 und der Spule 15 von denselben Bauelementen (Widerstand  $Rz4$  und Kondensator  $C4$ ) bestimmt. Dies hat den Vorteil, daß es nur eine Grenzfrequenz gibt, unabhängig von Schwankungen der Widerstands- oder Kapazitätswerten und auch temperaturunabhängig.

Während die Spule 15 in den Fig. 1 und 3 mit je vier Wicklungen ausgeführt wurde, ist im Ausführungsbeispiel nach Fig. 4 diese Spule dadurch gebildet, daß die Meßleitungen 16 und 17, die zu den Meßanschlüssen 18 und 19 eines Hallelementes 20 führen, so verlegt, daß sie eine Windung bilden, die von dem Magnetfeld des Magnetkerns 2 durchsetzt wird. Hier muß die von den Meßleitungen 16 und 17 eingeschlossene Fläche und der durch die Steuerleitungen 21 und 22 des Hallelementes fließende Strom so aufeinander abgestimmt werden,

daß sich die gewünschte Ausgangsspannung proportional zum Strom  $i_1$  im Stromleiter 3 bildet. Anstelle der Dimensionierung der Widerstände  $R_x$  und  $R_y$  in den Fig. 2 und 3 tritt hier also die Auswahl der Größe des Steuerstromes im Zusammenhang mit der von den Meßleitungen 16 und 17 eingeschlossenen Fläche. Bei der Anordnung nach Fig. 4 wird also die in der Spule 15 induzierte Spannung unmittelbar zu der Meßspannung  $U_h$  des Hallelementes addiert und dann einer entsprechend dimensionierten Auswerteschaltung zugeführt.

Fig. 5 zeigt den durch alle beschriebenen Schaltungsarten erreichbaren Verstärkungsverlauf der durch Kondensatoren und Widerstände beschalteten Verstärker. Die gestrichelt dargestellte Kurve  $KVB$  zeigt die Verstärkung eines eingangs beschriebenen bekannten Stromsensors mit über den gesamten Frequenzbereich konstantem Verstärkungsfaktor. In der Darstellung nach Fig. 5 teilt sich diese Kurve in sternförmig auseinandergehende Strahlen auf. Hiermit wird angedeutet, daß sich bei diesen Frequenzen induktive Einkopplungen bemerkbar machen, die vom Aufbau der Auswerteschaltung und vom Verlauf der Zuleitungen zum Magnetfeldsensor abhängen, dadurch nicht voraussagbar sind und die Abbildung des tatsächlich fließenden Stromes  $i_1$  verfälschen.

Nach der in Fig. 2 beschriebenen Schaltung entspricht der Verlauf der als ausgezogene Linie dargestellten Kurve  $KV2$  der Verstärkung des Verstärkers  $V2$ , (bzw. dessen Ausgangsspannung für den Fall eines als konstant angenommenen Stromes  $i_1$ ). Der Grenzfrequenzbereich liegt bei Frequenzen in der Nähe der Grenzfrequenz  $f_g$ . Diese wird durch die Dimensionierung der Parallelschaltung von bspw. Widerstand  $Rz1$  und Kondensator  $C1$  bestimmt und ist erreicht, wenn deren Wechselstromwiderstände gleich groß sind.

Da oberhalb des Bereiches um die Grenzfrequenz  $f_g$  im wesentlichen der Rückkopplungswiderstand des Verstärkers  $V2$  durch den Kondensator  $C1$  bestimmt wird, sinkt in diesem Bereich der Verstärkungsfaktor (Kurve  $KV2$ ) schnell ab und beträgt bei  $10 \cdot f_g$  (Wert =  $-20$  dB) nur noch  $1/10$  des Anfangswertes. Oberhalb von etwa  $20 \cdot f_g$  teilt sich die Kurve dann wieder — wie beim bekannten Stromsensor — auf, da auch hier die induktiven Einkopplungen nicht vermieden werden. Allerdings liegt die Verstärkung hier schon unter  $-20$  dB, so daß diese induktiven Einkopplungen praktisch nichts mehr zur Ausgangsspannung  $U_a$  in Fig. 2 beitragen, die von der Summe der Verstärkungsfaktoren der Verstärker  $V2$  und  $V3$  gebildet wird.

Die strichpunktierter dargestellte Kurve  $KV3$  stellt nun die Verstärkung des Verstärkers  $V3$  dar, der ja von der induzierten Spannung in der Spule 15 beaufschlagt wird. Die Parallelschaltung von Widerstand  $Rz2$  und Kondensator  $C2$  ist auf die gleiche Grenzfrequenz  $f_g$  wie der Verstärker  $V2$  eingestellt. Dadurch steigt die Verstärkung unterhalb von  $f_g$  mit der stetig anwachsenden Eingangsspannung an und wird — wie beim Verstärker  $V2$  — oberhalb von  $f_g$  durch den dort dominierenden Einfluß des Kondensators  $C2$  abgeschwächt. Bei diesen höheren Frequenzen hält sich dann die Abschwächung durch den Kondensator  $C2$  die Waage mit dem Anstieg der induzierten Spannung in der Spule 15, so daß sich eine konstante Verstärkung ergibt. Der Einfluß induktiver Einkopplungen oberhalb von etwa  $20 \cdot f_g$  ist damit vernachlässigbar, so daß das Frequenz- bzw. das Impulsverhalten des erfindungsgemäßen Stromsensors gegenüber bekannten direktaabbildenden Stromsensoren stark verbessert ist.

Fig. 6 zeigt nun für eine plötzliche Änderung des Stromes  $i_1$  die Gesamtausgangsspannung  $U_a$  eines direktabbildenden Stromsensors ohne zusätzliche elektrische Spule, beispielsweise mit einer Auswerteschaltung entsprechend der oberen Hälfte in Fig. 2 zur Bildung der Spannung  $U_a2$ , wenn diese — um über einen möglichst großen Bereich eine proportionale Spannung zum Strom  $i_1$  zu erhalten — ohne den Kondensator  $C_1$  ausgeführt wäre (Kurve KVB in Fig. 5).

Der Verlauf der gestrichelt dargestellten Spannungskurve  $U_a$  zeigt nun, daß zwar eine gute Anpassung an den geänderten Wert von  $i_1$  sich einstellt, daß dies aber unmittelbar nach der plötzlichen Änderung von  $i_1$  nicht der Fall ist.

Die entsprechenden Kurven sind in Fig. 7 für den Fall dargestellt, daß eine Anordnung nach der Erfundung vorgenommen wird. Hier sieht man — im vergrößerten Maßstab — daß die gestrichelt dargestellte Kurve  $U_a$  unmittelbar der Änderung des Stromes  $i_1$  (durchgezogene Kurve) folgt. Das dynamische Verhalten des erfundungsgemäßen direktabbildenden Stromsensors also wesentlich verbessert ist.

#### Patentansprüche

1. Direktabbildender Stromsensor mit einem vom zu messenden Strom ( $i_1$ ) beeinflußten Magnetkern (2) und einem den Fluß im Magnetkern (2) erfassenden Magnetfeldsensor (7), dessen Ausgangssignal einer Auswerteschaltung zugeführt wird und als Meßgröße für den zu messenden Strom ( $i_1$ ) dient, dadurch gekennzeichnet, daß zur Verbesserung der Stromabbildung bei schnellen Stromänderungen und hohen Frequenzen zusätzlich zum Magnetfeldsensor (7) eine ebenfalls vom Magnetfluß des zu messenden Stroms ( $i_1$ ) beeinflußte elektrische Spule (15) vorgesehen ist, daß die in dieser Spule (15) induzierte, der Stromänderung des zu messenden Stroms proportionale Spannung ( $U_{sp}$ ) ebenfalls der Auswerteschaltung zugeführt wird und daß die Auswerteschaltung Verstärkerschaltungen enthält, deren frequenzabhängige Verstärkerkennlinien durch entsprechende Dimensionierung so gewählt sind, daß bei niedrigen Frequenzen vorwiegend das Ausgangssignal des Magnetfeldsensors (7) und bei hohen Frequenzen vorwiegend die in der Spule induzierte Spannung ( $U_{sp}$ ) zur Bildung des Gesamtausgangssignals des Stromsensors beiträgt.
2. Direktabbildender Stromsensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die zusätzliche, vom Magnetfluß des zu messenden Stromes ( $i_1$ ) beeinflußte elektrische Spule aus Windungen besteht, die den Magnetkern (2) mit dem Magnetfeldsensor (7) umschließen.
3. Direktabbildender Stromsensor nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die elektrische Spule aus Bügeln (8—11) besteht, die den Magnetkern auf einer Unterlage festhalten und daß die Bügel durch eine gedruckte Schaltung in der Unterlage zu einer Spule miteinander verbunden sind.
4. Direktabbildender Stromsensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Magnetkern einen Luftspalt (6) aufweist, in dem sich der Magnetfeldsensor (7) befindet und daß die Zuleitungen zu dem Magnetfeldsensor so geführt sind, daß sie eine Windung bilden, die mindestens von einem Teil des Flusses des Magnetkerns durchsetzt wird,

so daß sich die vom Magnetfeldsensor erzeugte Spannung zu derjenigen Spannung addiert, die in den die Windung bildenden Zuleitungen induziert wird.

5. Direktabbildender Stromsensor nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Ausgangssignale des Magnetfeldsensors und der Spule über Verstärkerschaltungen verstärkt werden, die bis zu einem Grenzfrequenzbereich ein weitgehend proportionales Verstärkungsverhalten aufweisen und deren Verstärkungsfaktor sich bei höheren Frequenzen mit zunehmender Frequenz vermindert.
6. Direktabbildender Stromsensor nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Verstärkungsverminderung oberhalb des Grenzfrequenzbereiches bei der der Spule nachgeschalteten Verstärkerschaltung so gewählt ist, daß der Anstieg der induzierten Spannung in der Spule bei gleichbleibendem zu messenden Strom ( $i_1$ ) mit steigender Frequenz durch die damit verbundene Verringerung der Verstärkung kompensiert wird.
7. Direktabbildender Stromsensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bildung des Gesamtausgangssignals die Ausgangssignale des Magnetfeldsensors und der Spule zueinander addiert werden.
8. Direktabbildender Stromsensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als Magnetfeldsensor ein Hallgenerator (20) vorgesehen ist, dessen Ausgangsspannung gegebenenfalls nach Verstärkung über eine Spannungsteilerschaltung (Widerstände  $R_x$  und  $R_y$ ) dem Eingang eines gemeinsamen Verstärkers ( $V_4$ ) mit abhängig von einem Grenzfrequenzbereich zunächst proportionalen und dann abnehmenden Verstärkung zugeführt ist.
9. Direktabbildender Stromsensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bildung des Frequenzganges mit abnehmender Verstärkung oberhalb eines Grenzfrequenzbereiches der Ausgang eines Verstärkers über die Parallelschaltung eines Kondensators ( $C_4$ ) mit einem Widerstand ( $R_{z4}$ ) an den Eingang rückgekoppelt ist.

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

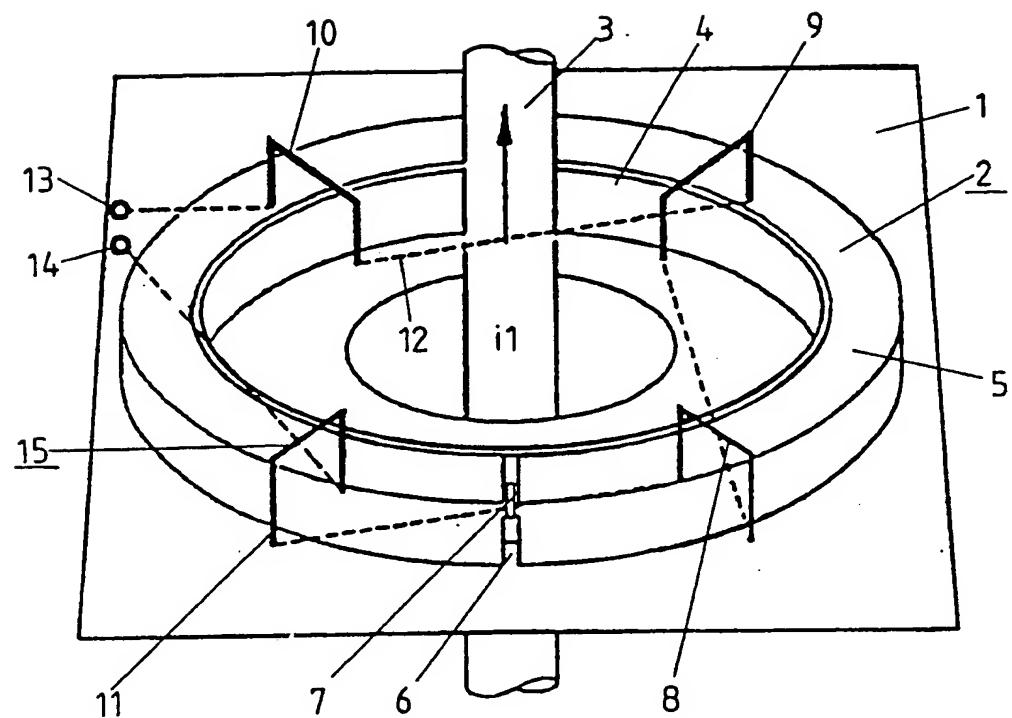
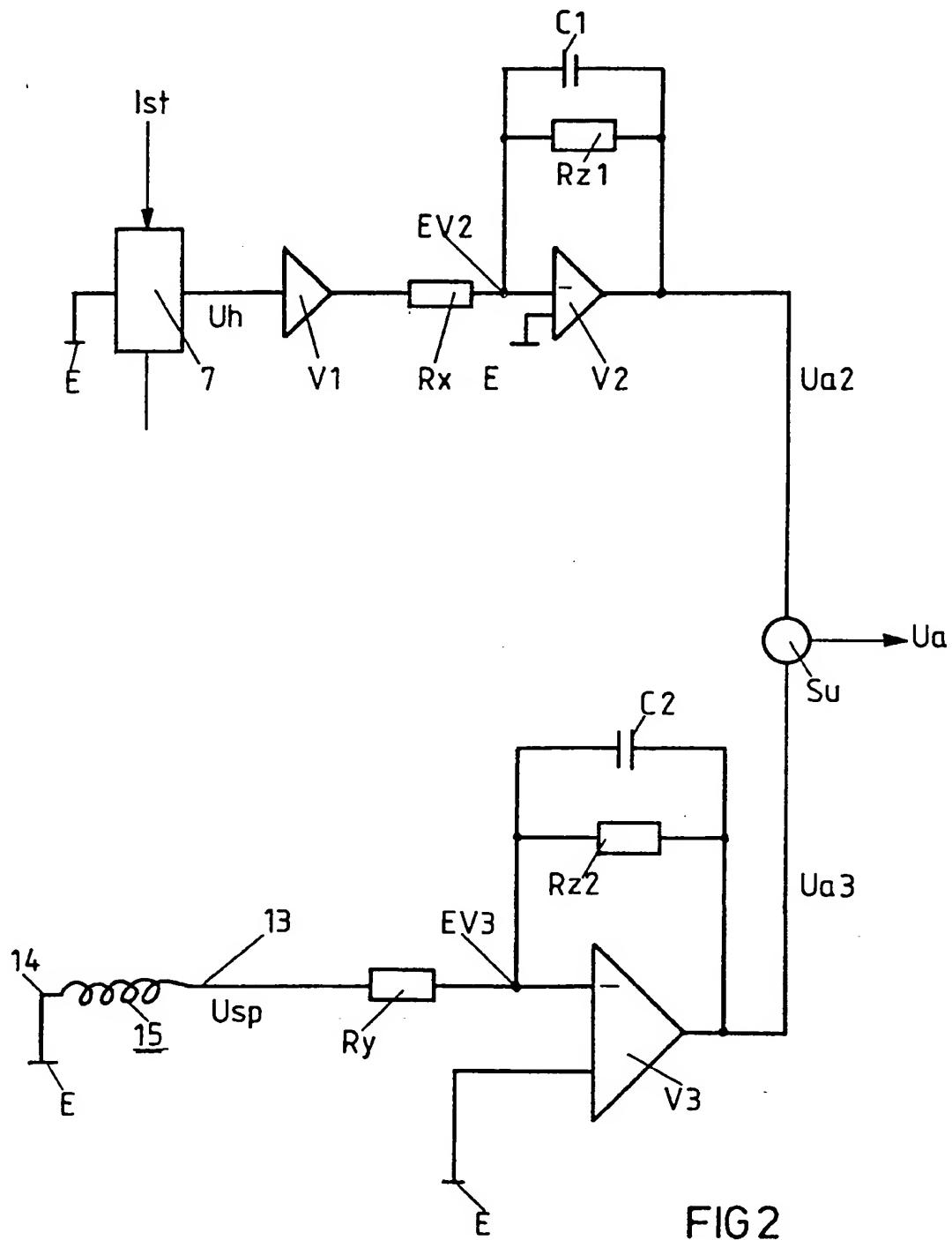


FIG 1



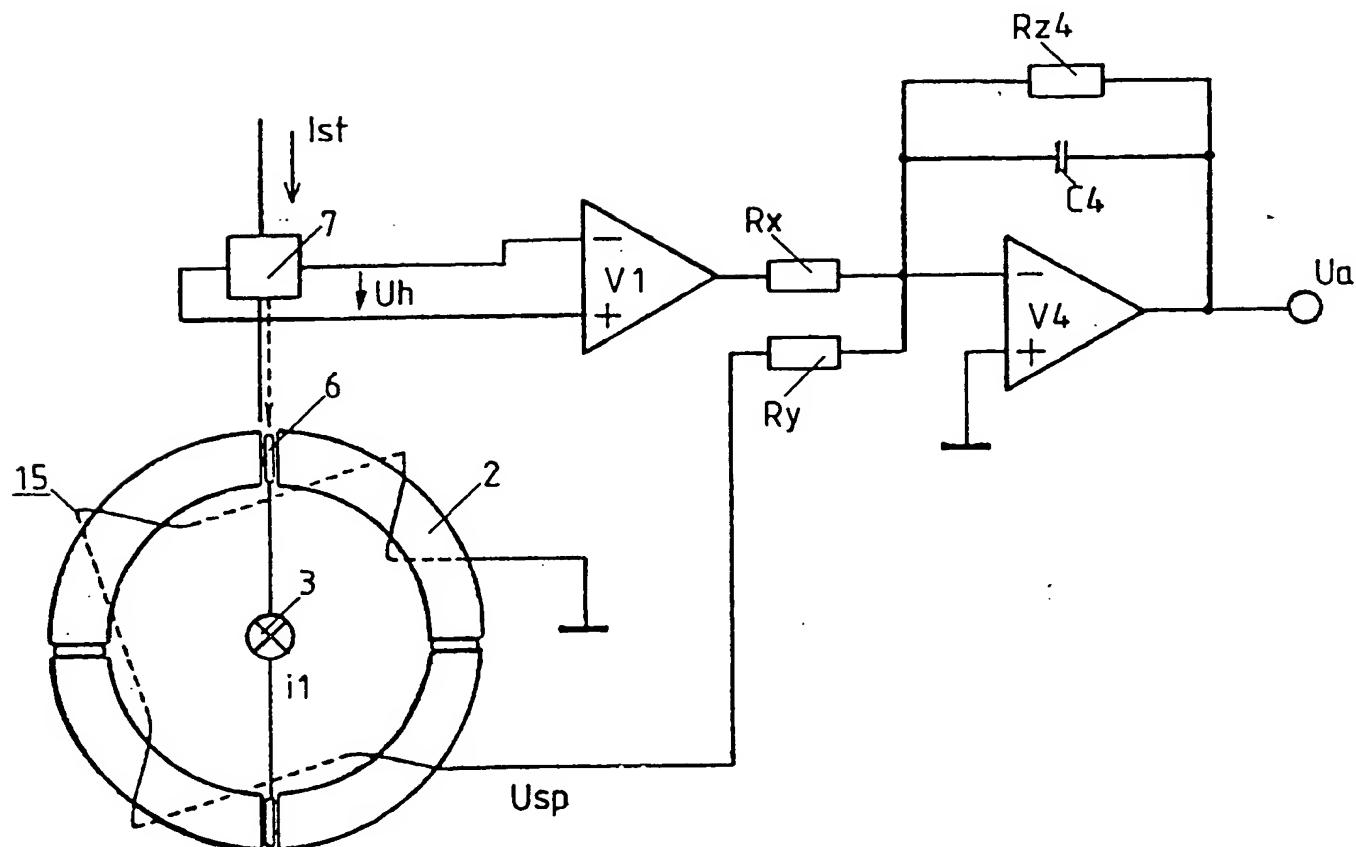


FIG 3

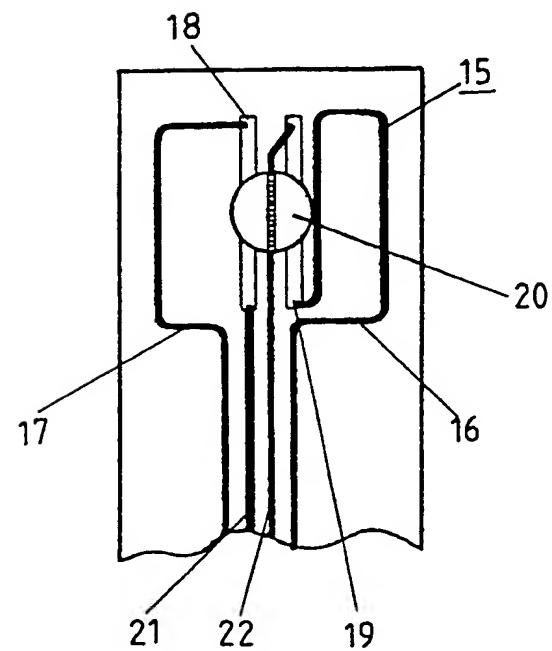
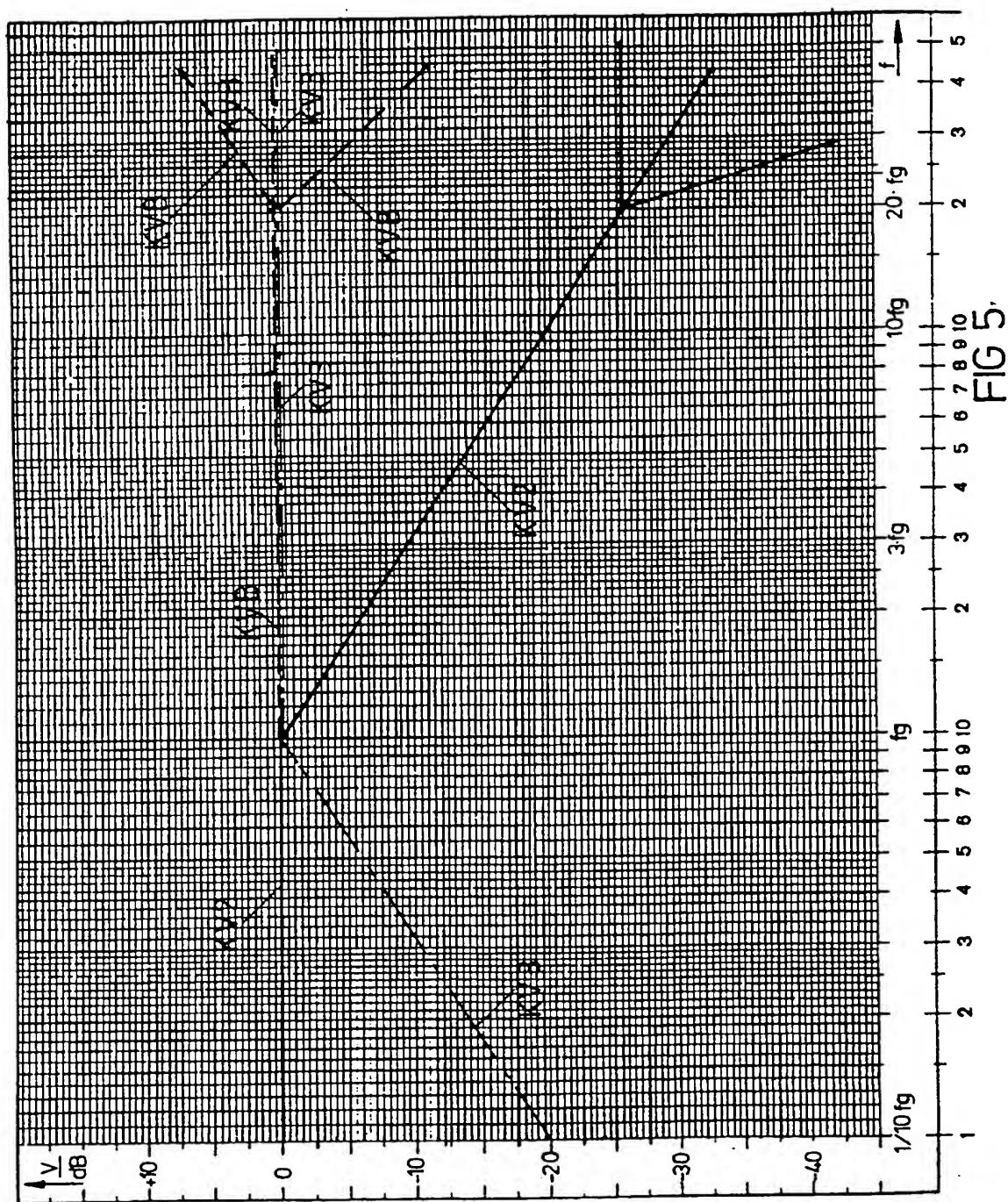


FIG 4



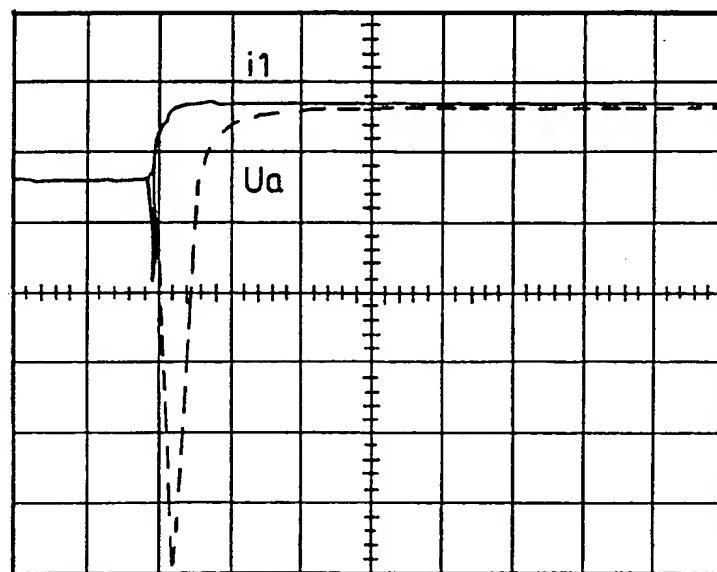


FIG 6

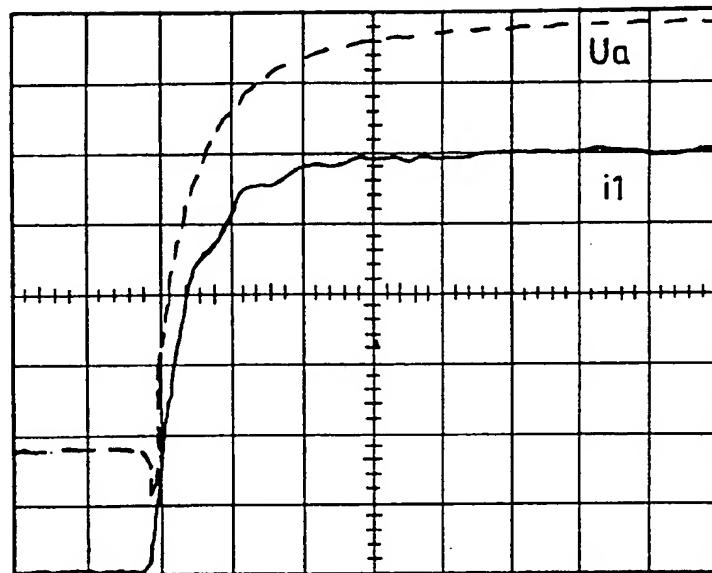


FIG 7